

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Соляnnиков В.А., Осипов А.И.
ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова,

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Развитие современного авиационного двигателестроения характеризуется возрастающей интенсификацией рабочего процесса, приводящей к увеличению температурно-силовой нагруженности основных деталей горячей части газотурбинного двигателя (ГТД), во многом ограничивающих его ресурс. С другой стороны, наряду с высокими техническими характеристиками ГТД, рыночная экономика требует снижения сроков и стоимости разработки двигателей. Это обуславливает необходимость создания и развития новых методов доводки элементов двигателя по параметрам прочности и ресурсу.

Экспериментальная отработка надежности и долговечности элементов контрукции ГТД осуществляется в настоящее время методами поузловой доводки [1] и их испытаниями в составе полноразмерного двигателя по программе, эквивалентной эксплуатационной [2]. Первые дают лишь сравнительную оценку прочности элементов и не позволяют определить их долговечность в реальных условиях эксплуатации, вторые являются трудоемкими и дорогостоящими.

Одними из ответственных и высоконагруженных деталей ГТД, требующих большого объема расчетных и экспериментальных исследований, являются рабочие лопатки турбины, которые в процессе эксплуатации подвергаются многофакторному неизотермическому нагружению.

Достигнутый в настоящее время уровень развития экспериментальных установок и испытательных стендов, позволяющих адекватно моделировать в лабораторных условиях эксплуатационный характер нагружения элементов лопатки, и подходов к описанию их предельного состояния при различных видах нагружения, включая многофакторное неизотермическое нагружение, позволяет сделать важный шаг вперед, проводить поэлементные эквивалентные испытания лопаток турбин в лабораторных условиях.

Необходимость проведения таких испытаний обусловлена:

- невозможностью получения достаточно полной информации о параметрах нагружения лопаток при их испытаниях в составе двигателя;
- отсутствием возможности контроля за появлением трещин в лопатках в процессе проведения испытаний двигателя, что не позволяет определить фактическую долговечность лопаток до разрушения;
- существенным повреждением двигателя при разрушении лопаток в процессе стендовых испытаний;

- неточностью описания условий предельного состояния лопаток турбин, обусловленных принятием тех или иных допущений при построении математических моделей.

Формирование программ эквивалентных испытаний лопаток турбин в лабораторных условиях включает следующие основные этапы:

- расчетно-экспериментальный анализ эксплуатационной нагруженности лопаток при эксплуатации двигателя по обобщенному полетному циклу и на его основе выбор наиболее нагруженных элементов лопатки;
- формирование лабораторных режимов нагружения для выбранного элемента;
- определение длительности эквивалентных испытаний элементов лопатки по сформированным режимам лабораторного нагружения на заданный ресурс.

Формирование лабораторных режимов многофакторного неизо-термического нагружения производится с соблюдением следующих принципов:

- обеспечение равенства максимальной температуры при испытаниях и в условиях эксплуатации;
- соответствие характера лабораторного нагружения эксплуатационному, включая одинаковость механизмов деформирования;
- обеспечение уровней переменных и статических напряжений при испытаниях, близких к эксплуатационным.

Расчет длительности эквивалентных испытаний элементов лопатки проводится из условия обеспечения равенства накопленных повреждений при испытаниях $\Pi_{\text{л}}$ и в условиях эксплуатации за ресурс $\Pi_{\text{э}}$:

$$\Pi_{\text{л}} = \Pi_{\text{э}} \quad (1)$$

или

$$a_{\text{л}} R_{\text{л}} = a_{\text{э}} R, \quad (2)$$

где $a_{\text{л}}$ и $a_{\text{э}}$ - средние доли повреждения соответственно за один лабораторный и эксплуатационный циклы нагружения;

$R_{\text{л}}$ - длительность эквивалентных испытаний;

R - заданный ресурс двигателя, выраженный в циклах.

Отсюда длительность эквивалентных испытаний элемента лопатки

$$R_{\text{л}} = a_{\text{э}} R / a_{\text{л}}. \quad (3)$$

Пусть $X_{1,\text{э}}; X_{2,\text{э}}; \dots; X_{N,\text{э}}$ и $X_{1,\text{л}}; X_{2,\text{л}}; \dots; X_{N,\text{л}}$ - параметры, характеризующие нагруженность элемента лопатки соответственно в эксплуатационных и лабораторных условиях, $Z = \Phi(X_1; \dots; X_N)$ - уравнение, описывающее предельное состояние элемента при нагружении, соответствующем эксплуатационному.

Тогда средние доли повреждения за один лабораторный $a_{\text{л}}$ и эксплуатационный циклы нагружения можно определить следующим образом

$$a_{\text{л}} = 1/Z_{\text{л},\text{р}}; \quad a_{\text{э}} = 1/Z_{\text{э},\text{р}}, \quad (4)$$

где $Z_{лр}$ и $Z_{э,р}$ - расчетные значения долговечности элемента в лабораторных и эксплуатационных условиях, определяемые с помощью предельного состояния:

$$Z_{лр} = \Phi(X_{1,л}; X_{2,л}; \dots; X_{N,л}); \quad Z_{э,р} = \Phi(X_{1,э}; X_{2,э}; \dots; X_{N,э}). \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (3) для определения длительности эквивалентных испытаний элемента лопатки в лабораторных условиях по режиму с параметрами нагруженности $X_{1,л}; X_{2,л}; \dots; X_{N,л}$ окончательно записывается следующим образом

$$R_{л} = R\Phi(X_{1,л}; X_{2,л}; \dots; X_{N,л}) / \Phi(X_{1,э}; X_{2,э}; \dots; X_{N,э}). \quad (6)$$

Неразрушение всех элементов лопатки при их эквивалентных испытаниях подтверждает работоспособность лопатки на заданный ресурс.

Проводя эквивалентные испытания элементов лопатки до разрушения, можно оценить их эксплуатационную долговечность

$$Z_{э} = Z_{л}\Phi(X_{1,э}; X_{2,э}; \dots; X_{N,э}) / \Phi(X_{1,л}; X_{2,л}; \dots; X_{N,л}), \quad (7)$$

где $Z_{л}$ - число циклов до разрушения элемента лопатки при эквивалентных испытаниях.

Минимальное значение $Z_{э}$ по результатам эквивалентных испытаний всех элементов лопатки в условиях эксплуатации

$$Z_{э,л} = \min\{Z_{1,э}; Z_{2,э}; \dots; Z_{M,э}\}, \quad (8)$$

где M - количество испытанных элементов лопатки.

Важным моментом при формировании программ эквивалентных испытаний является оценка влияния переменных режимов работы двигателя на истощение ресурса лопаток и их учет. С этой целью был проведен комплекс исследований долговечности лопаток турбины при термочисловом нагружении с введением дополнительных подциклов в цикл термонагружения (Рис.1). При этом размах деформации в подциклах E^* составлял 30 и 50 % от полного размаха деформации за цикл термонагружения E . Результаты испытаний представлены зависимостью относительной долговечности N^*/N , где N^* и N - долговечность лопаток при испытаниях соответственно с подциклами и без подциклов, от отношения размахов деформации E^*/E (Рис. 2).

Обработка экспериментальных результатов (Рис. 2) в двойных логарифмических координатах [3] позволила получить аппроксимирующую зависимость

$$\lg(1 - N^*/N) = n \lg(E^*/E), \quad (9)$$

где $n = 3$ с погрешностью не более 3%.

На рис.2 линией 1 показаны результаты расчета по уравнению

$$N^*/N = 1 - (E^*/E)^3, \quad (10)$$

полученному потенцированием зависимости (9).

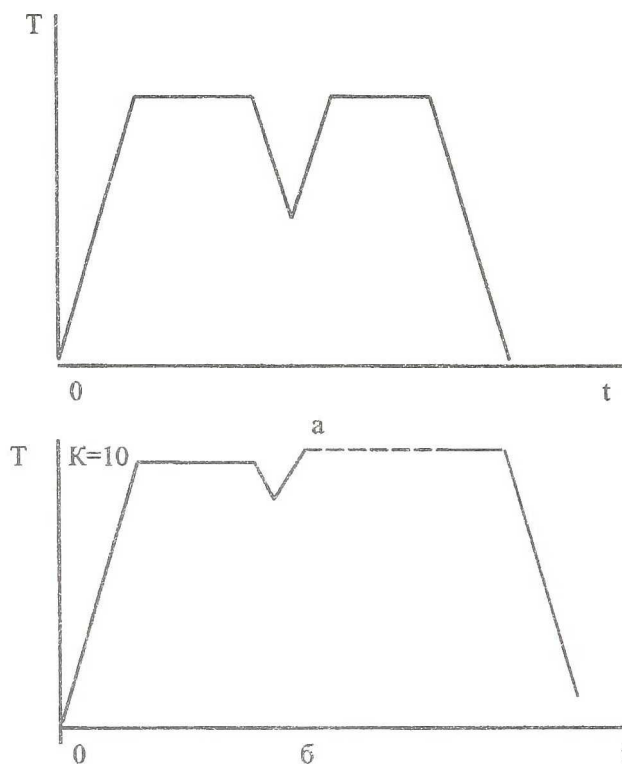


Рисунок 1 - Циклограмма исследований: а) –один цикл, б) $K=10$ подциклов

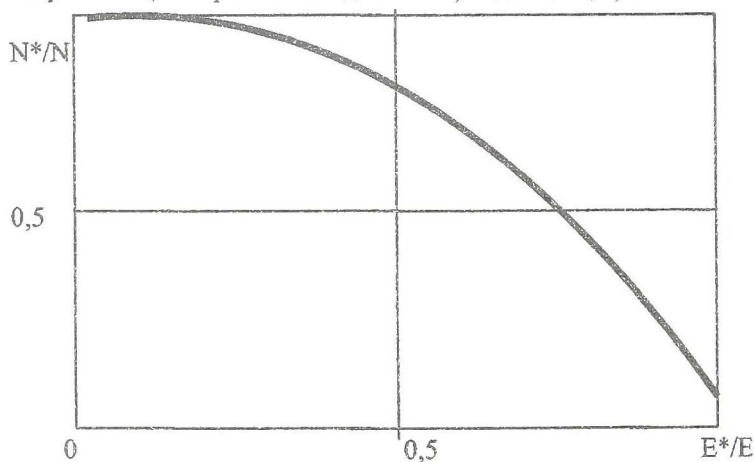


Рисунок 2 - Зависимость относительной долговечности от относительного размаха деформации.

Анализ результатов показывает, что введение дополнительных подциклов в цикл термонагружения, размах деформации в которых не превышает 30% от полного размаха деформации, не оказывает существенного влияния на долговечность лопаток: снижение долговечности при этом не превышает 4%. Это означает, что в первом приближении при формировании программ эквивалентных испытаний лопаток турбин в лабораторных условиях можно не учитывать такие подциклы, имеющие место в реальных условиях эксплуатации.

Предложенный метод эквивалентных испытаний лопаток турбин позволяет в лабораторных условиях на ранних стадиях доводки двигателя отработать оптимальные конструкторско - технологические решения и экспериментально проверить работоспособность лопаток на заданный ресурс.

Необходимо отметить, что данный метод применим и к другим деталям двигателя при наличии испытательного оборудования, позволяющего в лабораторных условиях адекватно моделировать эксплуатационное нагружение их элементов.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны метод формирования программ и методика проведения эквивалентных испытаний лопаток турбин в лабораторных условиях, в основе которых лежат уравнение предельного состояния лопаток при многофакторном неизотермическом нагружении и сформулированы принципы, определяющие диапазон изменения составляющих нагрузок.

2. На базе проведенного комплекса экспериментальных исследований долговечности лопаток турбин при сложных программах нагружения установлено, что дополнительные подциклы нагружения, вызывающие размахи деформации в опасных точках сечения лопатки, не превышающие 30 % от полного размаха деформации, не оказывают существенного влияния на долговечность лопаток, что позволяет не учитывать такие подциклы при формировании программ эквивалентных испытаний.

3. Проведена аппроксимация экспериментальных данных и с погрешностью не более 3 % получена связь относительной долговечности N^*/N и относительного размаха деформации E^*/E , позволяющая планировать эквивалентные испытания.

Список литературы

1. Еленевский Д.С. Проблемы развития методов поузловой доводки ГТД на конструкционную прочность// Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. - Куйбышев: КуАИ, 1986, - С. 33 -44.
2. Кунцов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1976. - 216 с.
3. Заботин В.Г., Первышин А.Н. Теплотехнические измерения в двигателях летательных аппаратов: Учебное пособие. - Куйбышев: КуАИ, 1983. - 70 с.